



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## ÚNAVOVÉ MODELY PRO VYHODNOCOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ

CREEP-FATIGUE MODELS FOR SOLDER JOINTS RELIABILITY PREDICTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÁCLAV NOVOTNÝ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. OLGA ŠVECOVÁ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Václav Novotný

**ID:** 103275

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Únavové modely pro vyhodnocování spolehlivosti pájených spojů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proved'te rešerši v oblasti bezolovnatého pájení a popište přehledně nejrozšířenější únavové modely, které jsou používány pro odhad spolehlivosti (životnosti) pájených spojů. Porovnejte dané únavové modely a uveďte jejich výhody a nevýhody. Doporučte nejvhodnější únavový model pro bezolovnaté pájky. V experimentální části navrhnete testovací strukturu, pomocí které ověříte aspoň jeden z únavových modelů vhodných pro bezolovnaté pájky a porovnejte získané údaje s teoretickými výpočty.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 3.6.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Olga Švecová

**prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Anotace**

Tento projekt je zaměřen na využití únavových modelů při odhadu spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů. Popisuje základní skupiny únavových modelů, jejich využití pro odhad spolehlivosti pájeného spoje, výhody a nevýhody. Jsou zde diskutovány vlastnosti jednotlivých modelů, které jsou založeny na různé bázi. Cílem tohoto projektu je najít nejvhodnější únavový model pro bezolovnatou pájku a dále navrhnout testovací strukturu, na které bude tento model ověřen. Získané výsledky budou porovnány s teoretickým výpočtem.

## **Annotation**

This project is focused on utilization of creep-fatigue models for estimate of reliability lead-free solder joints. It describes basic groups of creep-fatigue models, their usage for estimate of reliability solder joint, advantages and disadvantages. There are discussed properties of single models, which are on different base. Purpose of this project is find optimal creep-fatigue model for lead-free solder and devise a test structure to which the model will be verified. Results are compared with theoretical calculations.

## **Klíčová slova**

únavový model, pájený spoj, únava, spolehlivost, odhad, bezolovnatá pájka

## **Keywords**

creep-fatigue model, solder joint, fatigue, reliability, estimation, lead-free solder

## **Bibliografická citace**

NOVOTNÝ, V. *Únavové modely pro vyhodnocování spolehlivosti pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Olga Švecová

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma **Únavové modely pro vyhodnocování spolehlivosti pájených spojů** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb. včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 3. června 2010

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Olze Švecové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 3. června 2010

.....

podpis autora

# Obsah

ÚVOD .....	9
1. ŽIVOTNOST PÁJENÉHO SPOJE.....	10
2. TESTY PRO STANOVENÍ SPOLEHLIVOSTI PÁJENÉHO SPOJE .....	11
3. TYPY ÚNAVOVÝCH MODELŮ .....	12
3.1 Únavové modely založené na trvalé a pružné deformaci .....	13
3.1.1 Coffin-Manson .....	15
3.1.2 Engelmaier-Wild.....	16
3.1.3 Solomon .....	18
3.2 Únavové modely založené na deformaci tečením .....	18
3.2.1 Knecht-Fox .....	21
3.2.2 Syed .....	21
3.3 Únavové modely založené na pohybu energie .....	22
3.3.1 Pan .....	22
3.3.2 Heinrich .....	23
3.3.3 Darveaux .....	23
3.3.4 Gustaffson .....	24
3.3.5 Akay .....	24
3.4 Únavové modely založené na akumulaci poškození .....	25
3.4.1 Palmgren-Minerova hypotéza .....	25
3.5 Numerické analýzy pro odhad spolehlivosti .....	25
3.5.1 Metoda konečných prvků .....	25
3.5.2 Weibullovo rozdělení.....	26
3.5.3 Odhad spolehlivosti systému .....	26
3.6 Únavové modely pro zrychlené testování .....	26
3.6.1 Arrhenius.....	27
3.6.2 IPL .....	28
3.6.3 Eyring .....	29
4. PRAKTICKÁ ČÁST.....	30
4.1 Výpočet spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů .....	30
4.1.1 Engelmaier-Wild model .....	30

4.1.2	Coffin-Manson model.....	32
4.2	Testovací struktura pro testování spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů	33
5.	ZÁVĚR.....	39
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	40

## Úvod

Spolehlivost v elektrotechnice je dnes velmi diskutovaným tématem. Rozvíjející se nové technologie přinášejí stále více výzev k zajištění spolehlivosti elektronických výrobků. Zvyšující se poptávka po elektronických produktech, které splňují kritéria vysokého výkonu, nízké ceny a co nejmenších rozměrů a váhy, s sebou přináší vysoké nároky na vývoj takových produktů. Důležitost odhadu spolehlivosti pájených spojů se navíc zvyšuje s příchodem nových technologií v povrchové montáži a se vzrůstající mírou elektronických zařízení zejména v automobilovém průmyslu, v letectví a v mnoha dalších odvětvích. Odhad spolehlivosti pájených spojů u elektronických produktů můžeme vnímat v několika rovinách či směrech. Elektronický produkt, jenž je směřován do segmentu koncového zákazníka, má podstatně nižší stupeň priority v potřebě vysoké spolehlivosti, největší důraz se zde klade na cenu produktu a faktor spolehlivosti je spíše marketingovou součástí výrobku. Diametrálně odlišnou roli hraje spolehlivost v segmentech, které vyžadují za každých okolností, stoprocentní funkčnost produktu, tj. v letectví, ve zdravotnictví a podobně. V těchto odvětvích je proto požadavek na vysokou spolehlivost, nadřazen nad cenu koncového produktu. V poslední době se také začínají stupňovat požadavky na kvalitu výrobku, z hlediska jeho vlivu na životní prostředí. Každý výrobek má nějaký vliv na životní prostředí ve všech fázích jeho života.

Z tohoto důvodu se stává management životního prostředí ve výrobě důležitější než dříve. Získáním kontroly nad výrobními procesy a postupy, z pohledu jejich vlivu na životní prostředí, lze z výroby vyloučit využití nebezpečných látek a materiálů a omezit jejich negativní vliv na okolní prostředí. Zdokonalení výrobních procesů z hlediska vyšší šetrnosti k životnímu prostředí, však přináší i zvýšení nákladů na výrobu a výrobní prostředky. Proto vzniká na celém světě a zejména v EU, legislativa, jenž umožňuje ekologičtější přístup k výrobě prosazovat. Jedná se zejména o celou řadu doporučení či nařízení, které jsou definovány ve směrniciích. Klíčovými nařízeními, jenž mají dnes velký vliv na způsob výroby pájených spojů, jsou směrnice RoHS (Restriction of Hazardous Substances) a WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment). Směrnice RoHS byla vytvořena za účelem, omezit nebezpečné látky v elektrických a elektronických zařízeních. Směrnice WEEE se zabývá cílem, redukovat narůstající množství odpadu z elektronických zařízení a výrobků, a to recyklací a zpětným zpracováním. Vstupem těchto směrnic v platnost nastává nutnost náhrady olovnatých pájek za bezolovnaté, což s sebou přináší řadu problémů, z hlediska technologie výroby, spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů a zvýšení výrobních nákladů. Bezolovnaté pájení je náročnější a do technologického procesu výroby přináší nové faktory a potřebu zdokonalit výrobní postupy. Z pohledu spolehlivosti je důležité zajistit u bezolovnatého pájeného spoje, minimálně stejnou kvalitu jako při využití olova v pájce. Pro odhad spolehlivosti pájených spojů, můžeme dnes využít mnoho nejrůznějších matematických či statistických metod, z nichž každá má své specifické vlastnosti a výhody či nevýhody. V této práci budou tyto vlastnosti diskutovány.

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši v oblasti spolehlivosti pájených spojů a popsat nejrozšířenější únavové modely, které jsou používány pro odhad spolehlivosti olovnatých a bezolovnatých pájených spojů. Dále je cílem navrhnout testovací strukturu a ověřit alespoň jeden z únavových modelů, jenž jsou vhodné, pro bezolovnaté pájky a porovnat s teoretickým výpočtem.

# 1. Životnost pájeného spoje

Životnost výrobku je běžně definována dobou, za kterou se výrobek opotřebuje natolik, že nemůže plnit svoji funkci. Jelikož životnost většiny produktů představuje dobu několika let, již v minulosti se u klasických součástek zjišťovala životnost pomocí tzv. zrychlených zkoušek, což je v podstatě simulace pracovního režimu produktu za zvýšené, resp. snížené teploty, případně při zvýšené relativní vlhkosti, vibraci a podobně. Tyto faktory, které na pájený spoj působí, urychlují stárnutí a dochází tak k simulaci vnitřních jevů v pájených spojích a součástkách, kdy je urychlena jejich degradace. Jedná se především o elektrochemický proces koroze a fyzikální procesy difuze(viz.Obr.1). [8] [20]

Difuze materiálů se projevuje vznikem intermetalických slitin a jejich nárůstem. Tyto vrstvy, poté vykazují zhoršené elektrické vlastnosti, především vodivost, což má za následek degradaci a postupem času až nefunkčnost pájeného spoje.

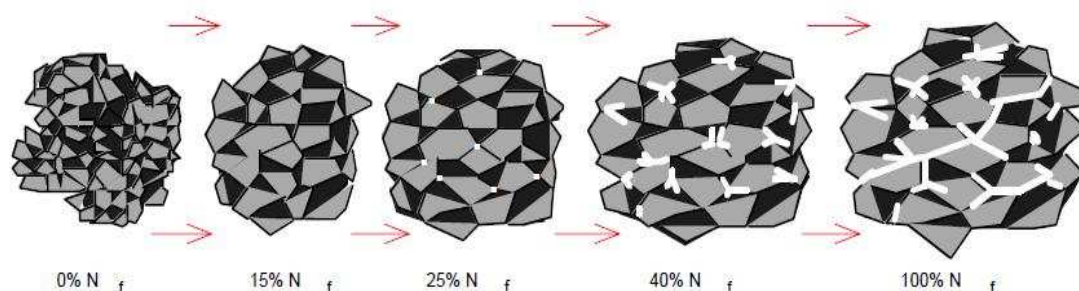
Elektrochemická koroze mění materiálové vlastnosti spoje, narušuje jeho homogenitu a zhoršuje adhezi, nakonec vede k jeho destrukci. [20]

Životnost pájených spojů se nejčastěji testuje teplotním cyklováním při různých rozdílech teploty, po určitou dobu nebo pro zvolený počet cyklů. Během těchto testů se sleduje funkčnost, integrita, vzhled a vodivost pájeného spoje.

Stanovení resp. odhad životnosti pájeného spoje je ovlivňováno mnoha faktory a z tohoto důvodu není vždy jednoduché tento odhad provést. Mezi základní faktory patří vlivy, které na pájený spoj působí během výrobního procesu, tj. zda je pájený spoj proveden co nejkvalitněji, dále vlivy výkonového zatížení spoje a vlivy prostředí, zejména teplota, vlhkost a podobně.

Pro stanovení životnosti pájeného spoje se nejčastěji používají následující testy:

- teplotní cyklování,
- teplotní šoky,
- vysokoteplotní rázy,
- zjišťování mechanických vlastností(tah, střih, ohyb),
- vibrace,
- migrace.

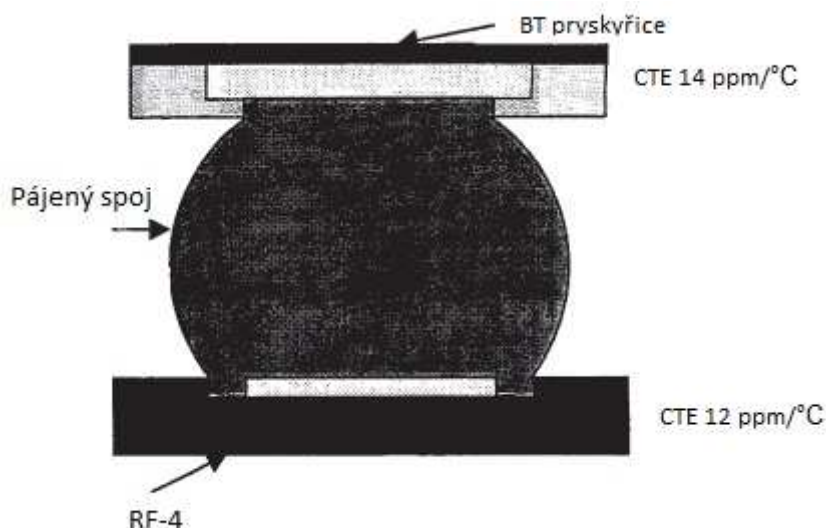


**Obr. 1:** Postup vzniku a růstu lomu v pájeném spoji [1]



## 2. Testy pro stanovení spolehlivosti pájeného spoje

Jakost pájených spojů může být posuzována z různých hledisek. Z optického hlediska je to tvar pájeného spoje, z funkčního hlediska je rozhodujícím parametrem spolehlivost a životnost. Je to čas, po který je zaručena spolehlivá funkce, to znamená vodivost spoje. Mezi faktory, které ovlivňují životnost spoje, patří zejména stárnutí materiálu, mechanické namáhání a tepelné namáhání. Pájené spoje se nejčastěji testují na spolehlivost z hlediska tepelného namáhání a účinků s tímto namáháním spojených. Tepelné namáhání může být vyvoláno důsledkem tepla, které působí na pájený spoj z okolí nebo vzniká v obvodu jako vedlejší produkt v důsledku průchodu proudu nebo vyzařovaného ztrátového výkonu, což se děje ve většině případů. Působení tepla na materiály způsobuje fyzikální a chemické děje, které mohou být buď nevratné, tj. stárnutí materiálu v důsledku změny struktury, difuze apod. nebo vratné, tj. mechanické prodlužování a smršťování, průhyby materiálu apod. Vliv tepla tedy má vliv na celkovou roztažnost materiálu, jenž je definována koeficientem teplotní roztažnosti materiálu (CTE). [20]



**Obr. 2:** Spojení BGA pouzdra a FR4 pájeným spojem [19]

Rozdíly mezi teplotním koeficientem teplotní roztažnosti desky plošného spoje, pájky a substrátu, na němž je osazena pájená součástka, mají zásadní vliv na integritu pájeného spoje (viz. Obr. 2). Pro stanovení spolehlivosti a životnosti pájených spojů se používá zejména teplotní cyklování. Výběr režimu teplotního cyklování používaného k vyhodnocení spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů je stěžejním rozhodnutím, neboť chování různých pájecích slitin se může měnit podle způsobu teplotního cyklování. Čím větší teplotní rozsah a čím větší počet cyklů je zvolen, tím větší je pravděpodobnost narušení pájeného spoje. Zvolený testovací režim by se tedy měl blížit pravděpodobnému pracovnímu prostředí, ve kterém se bude pájený spoj nacházet. Nejběžnější režim teplotního namáhání při testech v současnosti odpovídá cyklování v rozsahu teplot  $-55^{\circ}\text{C}$  až  $125^{\circ}\text{C}$ , tj. rozdíl  $180^{\circ}\text{C}$ . V této bakalářské práci je pouzdro BGA cyklováno v rozsahu teplot  $-20^{\circ}\text{C}$  až  $100^{\circ}\text{C}$ , tj. rozdíl  $120^{\circ}\text{C}$ . Tento rozsah teplot je typický pro testování v telekomunikační technice. [20]

V průběhu teplotního cyklování dochází k postupné únavě materiálu, což ještě může urychlovat zvýšená relativní vlhkost vzduchu. Tím dochází, k nárůstu intermetalické vrstvy, která je typická zhoršenými elektrickými vlastnostmi. Především je snížena elektrická vodivost intermetalické vrstvy, intermetalické vrstvy se postupně zvětšují a rostou a tento proces následně vede k degradaci a k celkové nefunkčnosti pájeného spoje. Dále dochází ke křehnutí spoje, což má za následek snížení jeho pevnosti. Postupně pak obvykle dochází k mechanickému narušení spoje, které může vést až k jeho prasknutí a odtržení. [20]

V oblasti testování teplotním cyklováním existuje šest základních a nejběžnějších režimů, které se často využívají. Cyklus A je využíván k testování armádních aplikací a z tohoto důvodu využívá velkého rozsahu teplot, tj.  $-55^{\circ}\text{C}$  až  $125^{\circ}\text{C}$ , tj. rozdíl  $180^{\circ}\text{C}$ . Cyklus B je využíván pro testování v leteckém a automobilovém průmyslu, tudíž jsou tu požadavky na teplotní rozsah stejné jako u armádních aplikací. Cyklus C je obvyklý pro testování v telekomunikační technice a nejvíce se blíží teplotnímu rozsahu, který je využit při testování pájených spojů dummy BGA pouzdra v této bakalářské práci. Cyklus E je využíván zejména ve spotřební elektronice, proto je rozsah teplot pouze  $60^{\circ}\text{C}$ . [20]

### 3. Typy únavových modelů

Hlavním cílem únavového modelu je odhad životnosti pájeného spoje. V následující kapitole jsou únavové modely rozděleny ve skupinách (viz. Tab.1), podle nejdůležitějšího faktoru, který hraje u daného modelu roli, při výpočtu životnosti pájeného spoje.

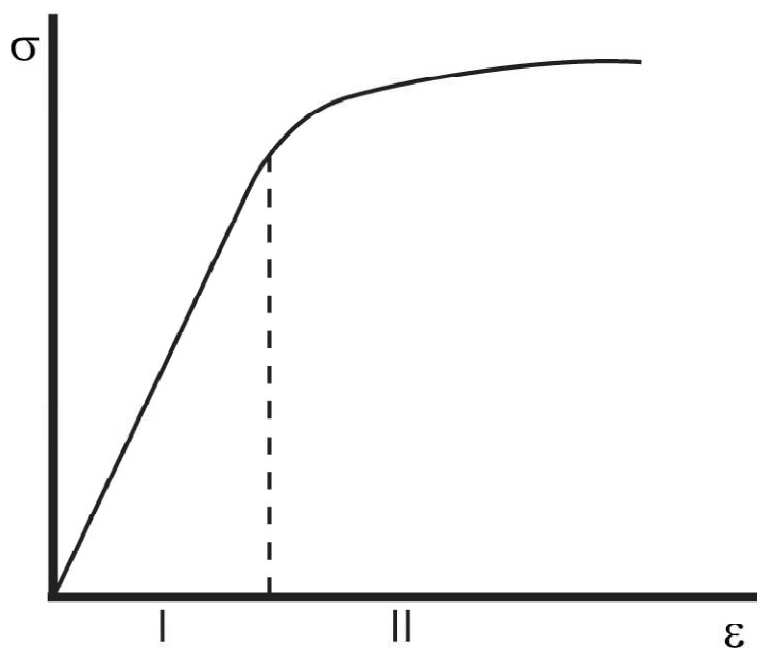
**Tab. 1:** Rozdělení únavových modelů

Únavový model	Číslo vztahu	Typ modelu	Možné využití
Coffin-Manson	1	tvárná deformace	Vše
Engelmaier-Wild	3	tvárná deformace	Vše
Solomon	9	tvárná deformace	Vše
Knecht-Fox	10	deformace tečením	Vše
Syed	11	deformace tečením	PBGA, SMD, NSMD
Pan	12	pohyb energie	LCCC
Heinrich	13	pohyb energie	BGA
Darveaux	14,15,16,17	pohyb energie	PBGA
Gustaffson	18	pohyb energie	Vše
Akay	19	pohyb energie	Vše
Palmgren-Miner	21	kumulace poškození	Vše
Arrhenius	23	zrychlené testování	Vše
IPL	28	zrychlené testování	Vše
Eyring	30	zrychlené testování	Vše

### 3.1 Únavové modely založené na trvalé a pružné deformaci

Při zatěžování materiálu mechanickou silou dojde k jeho deformaci, tzn., že změní tvar. Deformace závisí na velikosti i druhu namáhání. Velikost síly, která působí na materiál, poté rozhoduje o tom, zda bude deformace elastická či plastická, tj. vratná resp. nevratná. V praxi existuje mnoho druhů namáhání a deformace, např. v tahu, tlaku, ohybu, krutu, smyku. Často se také různé druhy namáhání mohou vzájemně kombinovat. Při popisu deformačního chování kovů je nejčastěji využíváno tzv. tahového diagramu.[9]

Tento diagram lze získat tak, že zkušební vzorek materiálu se upevní do čelistí zkušebního trhacího stroje a natahuje se, se stále zvyšující se silou. Při tom je zaznamenávána závislost smluvního napětí v tahu  $\sigma$  působícího na materiál na relativní deformaci materiálu  $\epsilon$ . Tahový diagram končí v okamžiku přetržení zkušebního vzorku. Obdobně lze zaznamenat rovněž deformaci, při namáhání v tlaku, ohybu, atd. Tahová zkouška ovšem bývá nejběžnější.[9]



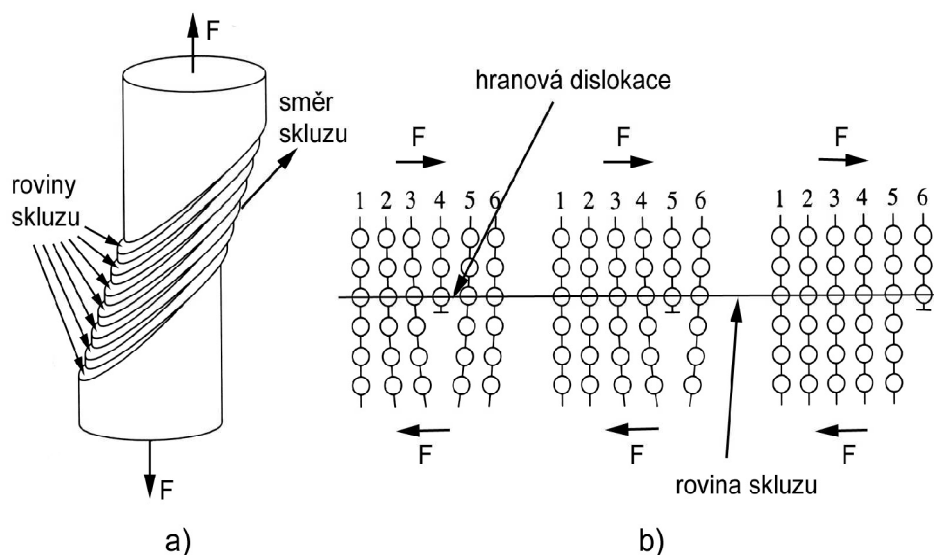
**Obr. 3:** Tahový diagram s vyznačením oblasti pružné (I) a plastické (II) deformace[9]

V tahovém diagramu (viz.Obr.3) můžeme rozlišovat dvě oblasti deformací. První oblast odpovídá pružné, tj. elastické deformaci a druhá oblast deformaci trvalé, tj. plastické. V úzké první oblasti se materiál deformuje pružně, tzn., že po odlehčení se vrací do původního tvaru, tj. se chová jako pružina. Na atomární úrovni je tato deformace spojena pouze s malým vychýlením atomů s rovnovážných poloh. V této oblasti je závislost napětí na relativní deformaci lineární a popisuje ji Hookův zákon. Ve druhé oblasti se materiál

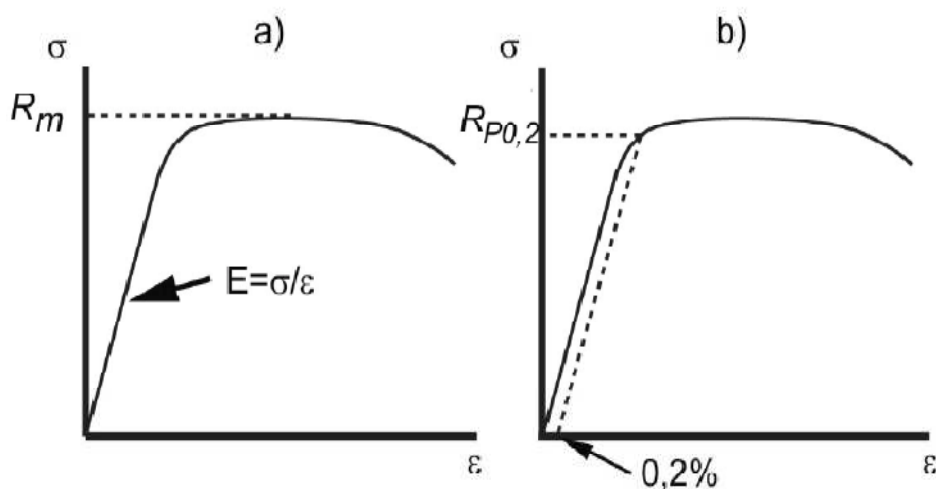
deformuje trvale, tzn. že po odlehčení se již do původního tvaru nevrátí. Plastická deformace vyžaduje nižší nárůst napětí (zatížení) než deformace elastická, o čemž svědčí nižší směrnice křivky ve druhé oblasti v porovnání s první oblastí (malému nárůstu napětí odpovídá velká deformace materiálu).[9]

Její mechanismus tedy není možno hledat v hromadném přeskupování velkého počtu atomů najednou, protože takový mechanismus by vyžadoval obrovské napětí.[9]

Plastická deformace kovů probíhá mechanismem, který se nazývá skluz (viz. Obr.4). Mechanismus skluzu si lze představit jako vzájemné posunutí dvou částí krystalu podél tzv. skluzové roviny (rovinu skluzu). Ke skluzu nedochází porušením a následným obnovením všech vazeb podél skluzové roviny najednou, ale pohybem mřížkových poruch – tzv. dislokací. Pohyb dislokací se nazývá rovněž skluz. Dislokace přítomné uvnitř krystalu (vznikají již během tuhnutí roztaveného kovu) jsou vlivem vnějšího napětí uvedeny do skluzového pohybu a dosáhnou-li povrchu krystalu, projeví se to jako stupínek. Makroskopická deformace je spojena s výstupem velkého počtu dislokací na povrchu krystalu. Posunutí částí krystalu průchodem dislokací je energeticky mnohem méně náročné než hromadné porušování všech vazeb podél skluzové roviny. Při skluzu dislokace totiž dochází k porušování vazeb jen mezi atomy v těsném okolí dislokace a vazby ve větší vzdálenosti zůstávají nezměněny. Takovým způsobem probíhá i skluz uvnitř jednotlivých zrn v polykrystalickém kovu, přičemž hranice zrn působí jako překážky pro pohyb dislokací. Přítomnost hranic zrn poté vede ke zpevnění materiálu. Čím je velikost zrn v materiálu menší, tím více hranice zrn se v něm nachází a tím vyšší je odolnost materiálu vůči plastické deformaci (viz. Obr.5). [9]



**Obr. 4:** Vzájemné posunutí (skluz) dvou částí krystalu (a), ke kterému dochází pohybem dislokací ve skluzových rovinách a jejich výstupem na povrch krystalu (b) [9]



**Obr. 5:** Odečtení základních mechanických vlastností materiálů z tahového diagramu: a) modul pružnosti v tahu  $E$  a mez pevnosti v tahu  $R_m$ , b) smluvní mez kluzu  $R_{P0,2}$ . [9]

### 3.1.1 Coffin-Manson

Coffin-mansonův vztah(1) se vztahuje na oblast tvrdého zatěžování, tedy tzv. nízkocyklové únavy. Nízkocyklová únava je způsobována napětími většími než mez kluzu. Coffin-Mansonův vztah patří mezi nejznámější modely, které jsou používány pro výpočet spolehlivosti pájených spojů. Tento vztah uvádí cyklické namáhání ve spoji, způsobené rozdíly v teplotních roztažnostech materiálů a předpokládaný počet cyklů do poruchy. Klíčovými parametry u toho modelu jsou koeficient únavové tažnosti, poměrné pnutí ve spoji a koeficient tvárnosti pájky, jenž se uvažuje ve výpočtu. Koeficienty únavové tažnosti a koeficienty tvárnosti byly pro různé druhy pájek získány experimentálně(viz.Tab.2).Poměrné pnutí ve spoji je možné vypočítat podle vztahu(2). Pro poměrné pnutí ve spoji jsou kritickými parametry délka součástky, koeficient únavové tažnosti součástky, rozdíl nejmenší a nejvyšší teploty při cyklickém namáhání spoje a výška pájeného spoje. Nevýhodou tohoto modelu, je absence úvahy frekvence cyklického namáhání. Model lze využít pro odhad spolehlivosti pájených spojů u všech typů pouzder.

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left( \frac{2\epsilon'_f}{\gamma_p} \right)^c \quad (1)$$

kde  $N_f$  je počet cyklů do poruchy  
 $\epsilon'_f$  je koeficient únavové tažnosti  
 $\gamma_p$  je poměrné pnutí ve spoji  
 $c$  je koeficient tvárnosti

Vztah(2) pro výpočet pnutí ve spoji

$$\gamma_p = \frac{L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{2h} \quad (2)$$

kde  $\gamma_p$  je poměrné pnutí ve spoji [Pa]  
 $L$  je délka součástky [m]  
 $\Delta\alpha$  je koeficient únavové tažnosti  
 $\Delta T$  je rozdíl teploty (T-T<sub>0</sub>) [K]  
 $h$  je výška pájeného spoje [m]

**Tab. 2:** Přehled koeficientů únavové tažnosti a tvárnosti pro různé druhy pájek [3]

Typ pájky	$\epsilon'_f$	c
Sn-3.5Ag-0.5Cu	3.0685	-0.73
Sn-3.5Ag-1Cu	0.3031	-40.43
SnPb	1.2017	-0.6083

### 3.1.2 Engelmaier-Wild

Tento model(3) je v podstatě modifikovaný Coffin-Mansonův vztah a je také zdokonalením Solomonova modelu. Engelmayer-Wildův vztah podobně jako Coffin-Mansonův vztah patří do oblasti modelů, které počítají s nízkocyklovou únavou materiálu. Velkou výhodou toho modelu je, že na rozdíl od Coffin-Mansonova vztahu, počítá také s deformací tečením. Další velkou výhodou je možnost započítání cyklické teploty a frekvence cyklování, do exponentu tvárnosti (7). Základními faktory v exponentu tvárnosti, jsou C<sub>0</sub>, který bere v úvahu vztah mezi procesem tečení a výsledným počtem cyklů do chyby, dále C<sub>1</sub> je vztahem mezi teplotou a rychlostí tečení a C<sub>2</sub>, jenž je faktor časové závislosti na celkovém procesu tečení. Toto podstatně zpřesňuje konečný odhad životnosti pájeného spoje a můžeme tak odhad přizpůsobit provozním podmínkám, ve kterých se bude pájený spoj nacházet.

Vztah(3) pro výpočet počtu cyklů do poruchy

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left( \frac{2\epsilon'_f}{\Delta D} \right)^c \quad (3)$$

kde  $N_f$  je počet cyklů do poruchy  
 $\Delta D$  je cyklické únavové poškození  
 $\epsilon'_f$  je koeficient únavové tažnosti  
 $c$  je exponent tvárnosti

Vztah(4) pro výpočet cyklického únavového poškození pro bezolovnatou pájku:

$$\Delta D = \left[ \frac{F \cdot DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T}{h} \right] \quad (4)$$

kde F je pracovní faktor  
 $\Delta CTE$  je rozdíl součinitelů teplotní roztažnosti plošného spoje a součástky  
DNP je vzdálenost od výchozího bodu/desky  
 $\Delta T$  je rozdíl teploty (T-T<sub>0</sub>) [K]  
h je výška pájeného spoje [m]

Vztah(5) pro výpočet cyklického únavového poškození pro olovnatou pájku:

$$\Delta D = \left[ \frac{F \cdot K \cdot (DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T)^2}{(133psi) \cdot A \cdot h} \right] \quad (5)$$

kde F je pracovní faktor  
 $\Delta CTE$  je rozdíl součinitelů teplotní roztažnosti plošného spoje a součástky  
DNP je vzdálenost od výchozího bodu/desky  
 $\Delta T$  je rozdíl teploty (T-T<sub>0</sub>) [K]  
h je výška pájeného spoje [m]  
K je tvrdost olova ve směru neutrálního bodu

Vztah(6) pro výpočet exponentu tvárnosti:

$$\frac{1}{c} = c_0 + c_1 T_{sj} + c_2 \ln \left( 1 + \frac{t_0}{t_D} \right) \quad (6)$$

kde C<sub>0</sub> je vztah mezi procesem tečení a výsledným počtem cyklů do chyby  
C<sub>1</sub> je faktor teplotní závislosti na rychlosti tečení  
C<sub>2</sub> je faktor časové závislosti na dokončení procesu tečení  
T<sub>sj</sub> je průměrná cyklická teplota pájeného spoje  
t<sub>D</sub> je polovina doby trvání cyklu

Vztah(7) pro výpočet průměrné cyklické teploty pájeného spoje:

$$\bar{T}_{sj} = \frac{1}{4} (T_c + T_{c,0} + T_s + T_{s,0}) \quad (7)$$

kde T<sub>sj</sub> je průměrná cyklická teplota pájeného spoje  
T<sub>c</sub>, T<sub>c,0</sub> je rozdíl cyklické teploty na komponentě  
T<sub>s</sub>, T<sub>s,0</sub> je rozdíl cyklické teploty na substrátu

**Tab. 3:** Parametry pro výpočet exponentu tvárnosti pro různé druhy pájek [14]

Typ Pájky	Parametry pájky				
	$\epsilon'_f$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$T_0$
SnPb	0.325	0.442	6.00e-04	-1.74e-02	360
SAC405/305	0.425	0.480	9.30e-04	-1.92e-02	500
SAC205	0.250	0.480	9.30e-04	-1.92e-02	500
SAC105	0.225	0.480	9.30e-04	-1.92e-02	500
SnAg	0.275	0.430	6.30e-04	-1.92e-02	400

### 3.1.3 Solomon

Solomonův model(8) je svými parametry a zaměřením velmi podobný Coffin-Mansonovu a Engelmayer-Wild vztahu a lze ho také využít pro všechny typy pájených spojů. Tento model můžeme využít v oblasti nízkocyklové únavy. Nevýhodou Solomonova modelu je absence frekvence cyklování, tudíž není tak přesný jako Engelmayer-wild model.

$$\Delta\gamma_p N_p^\alpha = \theta \quad (8)$$

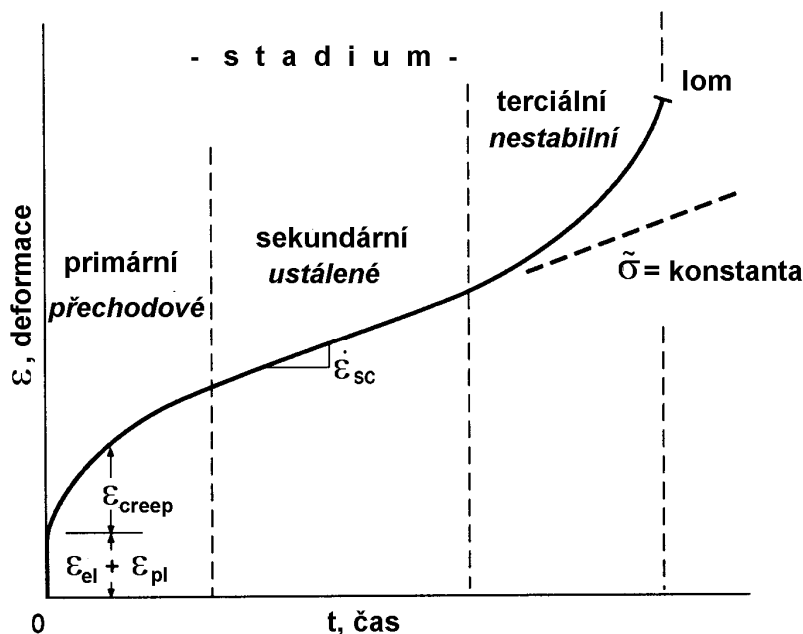
kde  $N_p$  je počet cyklů do chyby  
 $\gamma_p$  je poměrné pnutí ve spoji  
 $\Theta$  je obrácený koeficient únavové tažnosti  
 $\alpha$  je materiálová konstanta

## 2.2 Únavové modely založené na deformaci tečením

Modely založené na deformaci tečením se zaměřují vyloženě na jev deformace tečením v pájeném spoji. Deformace tečením je pomalá časově závislá deformace, ke které dochází v průběhu dlouhodobého působení vysokých teplot při konstantním zatížení nebo konstantním napětím nižším než mez kluzu. Mechanismus tečení má tři etapy(viz.Obr.6) s rozdílnou rychlostí plastické deformace .V primárním stádiu je deformační zpevňování výraznější než odpevňování a klesá rychlost tečení. V sekundárním stádiu je tzv. tečení ustálené a závislost deformace na čase je lineární, určuje se rychlost tečení. V terciálním stádiu vznikají lokální poruchy soudržnosti, např. kavity či trhliny. Následně dochází k porušení celistvosti a k lomu. Tyto pochody probíhají při napětích menších než je mez kluzu. Z konstrukčního hlediska má největší význam sekundární tečení, které je definované mezi tečení, což je napětí, které při dané teplotě v daném čase způsobí přípustnou deformaci. Čas a přípustná deformace jsou dány požadavkem na funkční životnost součásti). Pokud je rozhodující zachování celistvosti součásti bez ohledu na deformaci, určuje se pevnost při tečení, která je definovaná jako napětí, které ve stanoveném čase způsobí lom. Příčinou deformace tečením je difuze atomů mřížky pod účinkem napětí a zvýšené teploty. U

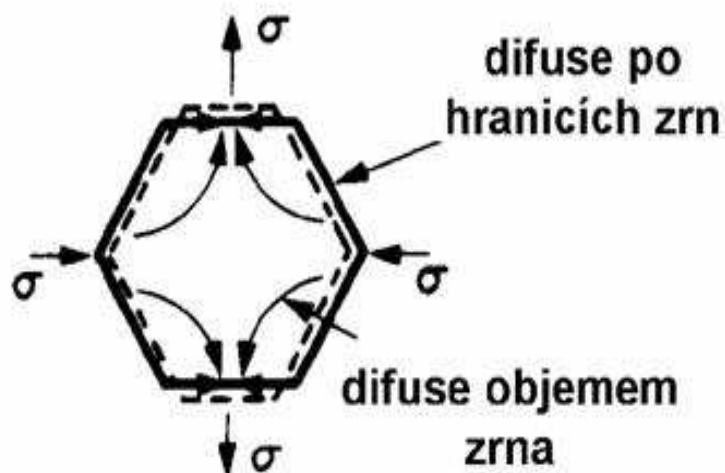


kovových materiálů se rozlišují dva typy deformace tečením, tj. difuzní tečení(viz.Obr.7) a dislokační tečení(viz.Obr.8). Difuzní tečení může probíhat objemem zrn, což se děje při nižším napětí a při vysoké teplotě nebo po hraních zrn, tj. při nižším napětí a nižší teplotě. [23]



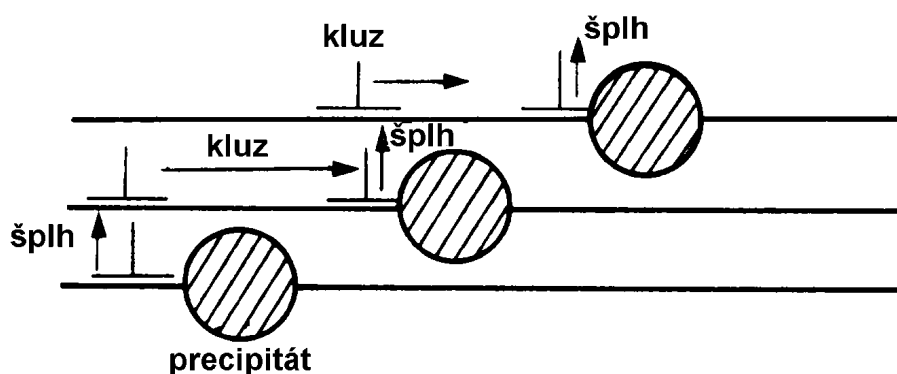
**Obr. 6:** Růst trvalé deformace  $\epsilon_{pl}$  a průběh rychlosti tečení  $V$  v čase [23]

Difuzní tečení probíhá v krystalických materiálech. Mezi materiály s krystalickou strukturou patří kovy, dále slitiny kovů a keramika. Základní strukturní jednotkou krystalických materiálů je atom. Zde se liší krystalické materiály od polymerů, kde je základní strukturní jednotkou dlouhá molekula. Hlavním prvkem deformace tečením v krystalických materiálech je difuze atomů. Při deformaci tečením probíhá v podstatě plastická deformace, jenž je způsobována součinností dvou mechanismů, které zahrnuje difuzní a dislokační tečení. Difuzní tečení vzniká při nízkých napětích, ale při relativně vysoké teplotě. Hranice, jenž jsou mezi krystalovými zrny jsou v podstatě neuspořádané oblasti, ze kterých může probíhat difuze vakancí do krystalové mřížky zrna. V zatíženém tělese v okolí hranic zrn, které jsou orientovány kolmo k tahovému napětí, dochází k tahové deformaci a v okolí hranic, které jsou rovnoběžné s napětím, k deformaci tlakové. V místech tahové deformace vznikají vakance a v místech tlakové deformace intersticiální atomy. Koncentrace bodových poruch se vyrovnávají prostřednictvím difuze a ve směru tahového napětí se zrna prodlužují a dochází k trvalé deformaci tečením. Jedná-li se o difuzi krystalovou mřížkou, tj. difuzi objemem zrna, probíhá tzv. Nabarrovo-Herringovo tečení. V případě difuze atomů podél hranic zrn, jde o Cobleho tečení. Oba zmíněné mechanismy difuzního tečení jsou viskózní povahy. [23]



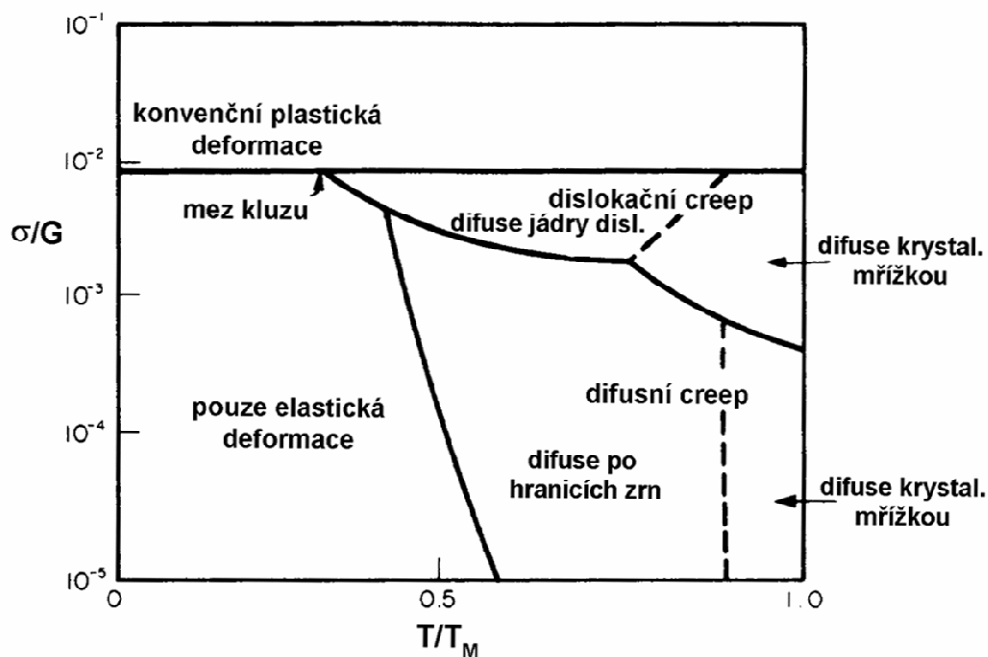
**Obr. 7:** *Princip difuze po hranicích zrn a objemem zrna [23]*

Plastická deformace materiálů s krystalovou mřížkou je podmíněna pohybem dislokací. Napětí pro pohyb dislokací musí překonat odpor krystalové mřížky nebo překonat překážky vyvolané distorsí krystalové mřížky. Difuze atomů může vyvolat uvolnění dislokací a tak usnadnit plastickou deformaci, což je v podstatě dislokační tečení. Síla, která působí na dislokaci ve skluzové rovině je v rovnováze s reakční silou od precipitátu. Pokud skluzová rovina neprochází středem precipitátu, potom se zde objevuje složka síly, která se snaží vytlačit dislokaci z její skluzové roviny. Dislokace se nemůže tímto směrem pohybovat přemísťováním atomů ve skluzové rovině, ale může k jejímu pohybu dojít tímto směrem v případě, že atomy které, tvoří hranu vložené poloroviny difundují. Tento proces se nazývá šplh dislokací a jelikož je podmíněn difuzí, dochází k němu pouze za vyšších teplot. Dislokační tečení je ovládáno zejména difuzními procesy. Z hlediska struktury v případě dislokačního tečení nehrají roli hranice zrna ale je zde velká závislost na napětí.[23]



**Obr. 8:** *Princip dislokačního tečení [23]*

Vzájemné vztahy mezi deformačními mechanismy, jsou popsány ve formě tzv. deformačních map. V těchto mapách, jsou vyznačeny oblasti napětí a teploty nebo rychlosti stacionárního tečení a napětí, ve kterých probíhá určitý mechanismus deformace tečením. Diagramy tohoto typu byly experimentálně proměřeny, pro řadu technických materiálů a slouží jako podklady, pro volbu materiálu pro součásti, které pracují za zvýšených teplot.[23]



Obr. 9 : Deformační mapa [23]

### 3.2.1 Knecht-Fox

Je model(9), založený na principech deformace tečením. Klíčovým parametrem u tohoto modelu je experimentálně získaná konstanta C, která závisí na kritériích chybovosti a mikrostruktuře pájky. Dále  $\Delta\gamma_{mc}$  je rozsah napětí v pájeném spoji, jenž způsobuje únava materiálu.

$$N_f = \frac{C}{\Delta\gamma_{mc}} \quad (9)$$

kde  $N_f$  je počet cyklů do poruchy  
 $C$  je konstanta  
 $\Delta\gamma_{mc}$  je rozsah napětí způsobeného únavou materiálu

### 3.2.2 Syed

Tento model je zaměřen na mechanismy, které probíhají v tzv. sekundárním stádiu tečení. Příčinou deformace tečením je difuze atomů mřížky pod účinkem napětí a zvýšené teploty. Model se zabývá difusním tečením po hranicích zrn, které probíhá při nízkém napětí a na rozdíl od difuze objemem zrn, také při nižší teplotě a dále zahrnuje difusi krystalickou

mřížkou. Ve vztahu je celková deformace tečením rozdělena do dvou částí. První část  $D_{\text{gbs}}$  popisuje difusi tečením po hranicích zrn a druhá část  $D_{\text{mc}}$  popisuje difusi krystalickou mřížkou.  $D_{\text{gbs}}$ , resp.  $D_{\text{mc}}$  tedy ve vztahu, představuje nárůst deformačního tečení prostřednictvím těchto dvou mechanismů za jeden cykl.

$$N_f = ([0.022D_{\text{gbs}}] + [0.063D_{\text{mc}}])^{-1} \quad (10)$$

kde  $N_f$  je počet cyklů do poruchy  
 $D_{\text{gbs}}$  je popis difuze tečením po hranicích zrn  
 $D_{\text{mc}}$  je popis difuze krystalickou mřížkou

### 3.3 Únavové modely založené na pohybu energie

Modely založené na pohybu energie v pájeném spoji tvoří největší skupinu únavových modelů. Tyto únavové modely se využívají pro odhad životnosti pájeného spoje, na základě určení naakumulované hysterezní energie. S přibývajícím počtem cyklů se stabilizuje cyklická křivka napětí-deformace, tzv. hysterezní smyčka a amplituda deformace při měkkém cyklu a amplituda napětí při tvrdém cyklování zůstávají konstantní. Plocha hysterezní smyčky představuje energii, která je pohlcena jednotkovým objemem materiálu během jednoho cyklu. Podílem této energie a hustoty deformační energie téhož cyklu je definován koeficient vnitřního útlumu, který charakterizuje kinetiku hromadění únavového poškození.

Koeficient vnitřního útlumu je rostoucí funkcí amplitudy deformace a velmi silně závisí na teplotě a frekvenci zatěžování. Příčinou je uplatňování rozdílných mikromechanismů rozptylu pohlcené energie. Pohlcená deformační energie, která se projevuje lokalizovaných zvýšením teploty, má za následek vznik viskózního tolu a předčasný lom konstrukční části. Při rostoucí kumulaci lokalizované plastické deformace během cyklického zatěžování se v nejvíce namáhaných povrchových vrstvách materiálu iniciují skluzovým dislokačním mechanismem krátké únavové trhliny. [24]

#### 3.3.1 Pan

Tento model(11), jenž je založen na únavové energii, řeší kritickou hodnotu akumulované energie, tj. CASE(Critical accumulated strain energy). Tento model vychází z předpokladu, že se při pnutí energie akumuluje v pájeném spoji během tepelného cyklování a eventuálně dosáhne kritické hodnoty, tj C. Kritická hodnota hustoty energie pnutí v pájeném spoji se uvádí 4.55 Mpa/mm<sup>3</sup>. Konstanty a,b, byly získány z mnohonásobné lineární regrese metodou konečných prvků. Hodnoty  $E_p$  a  $E_c$ , které reprezentují tvárnou, resp. pružnou deformaci, byly taktéž získány metodou konečných prvků.

$$C = N_f^*(aE_p + bE_c) \quad (11)$$

kde  $C$  je kritická hodnota akumulované energie  
 $N_f^*$  je počet cyklů do chyby  
a,b konstanty

$E_p$  energie tvárné deformace  
 $E_c$  je energie pružné deformace

### 3.3.2 Heinrich

Tento model(12) uvažuje počet cyklů do počátku lomu. Vztah byl úspěšně použit při odhadu životnosti pájených spojů u BGA pouzder.

$$N_o = 18083\Delta W^{-1.46} \quad (12)$$

kde  $N_f$  je počet cyklů do začátku lomu  
 $W$  je energie v pájeném spoji

### 3.3.3 Darveaux

Daurveuho model(13) je model, jenž je založen, na přírůstku nepružné energie v pájeném spoji během cyklování. Odhad spolehlivosti zpřesňují experimentálně získané materiálové konstanty, které uvažují i povahu pájky.

Nejprve vypočteme počet cyklů do začátku lomu a míru růstu lomu během jednoho cyklu a poté získáme charakteristickou životnost pájeného spoje. Tento model je velmi vhodný pro výpočet spolehlivosti pájených spojů u BGA pouzder.

Vztah(14) pro výpočet počtu cyklů do začátku lomu:

$$N_o = C_1\Delta W^{C_2} \quad (13)$$

kde  $N_o$  je počet cyklů do počátku lomu  
 $C_1, C_2$  jsou materiálové konstanty  
 $\Delta W$  přírůstek nepružné energie za jeden cykl

Vztah(14) pro výpočet rozšiřování lomu:

$$\frac{da}{dN} = C_3\Delta W^{C_4} \quad (14)$$

kde  $da/dN$  míra růstu lomu za jeden cykl  
 $C_3, C_4$  jsou materiálové konstanty  
 $\Delta W$  přírůstek nepružné energie za jeden cykl

Vztah(15) pro výpočet charakteristické životnosti:

$$N_{\alpha} = N_0 + \frac{a}{\frac{da}{dN}} \quad (15)$$

kde  $\alpha$  je celková délka lomu před chybou, která je definována jako kompletní oddělení pájeného spoje od pouzdra

Vztah(16) pro výpočet průměrného objemu energie v systému:

$$\Delta W_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n dW_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (16)$$

kde

$dW_i$  je přírůstek nepružné energie části i za jeden cykl  
 $n$  je celkový počet uvažovaných částí  
 $V_i$  je objem části i

### 3.3.4 Gustaffson

V této rovnici(17) je celková doba do chyby získána z kombinace doby do počátku lomu a rychlosti růstu lomu. Každý z těchto mechanismů, tj. doba do počátku a lomu a rychlost růstu lomu je v rovnici značena indexy „p“ a „s“.  $N_{aw}$  je počet cyklů do chyby a  $a$  je konečná maximální délka lomu.

$$N_{aw} = N_{0s} + \frac{a - (N_{0s} - N_{0p}) \frac{da_p}{dN}}{\frac{da_s}{dN} + \frac{da_p}{dN}} \quad (17)$$

kde  $N_{aw}$  je počet cyklů do poruchy  
 $a$  je nejdelší možná délka lomu

### 3.3.5 Akay

Tento model (18) odhaduje pouze počet cyklů do začátku lomu. Model byl použit při testování odhadu spolehlivosti pájených spojů na LLCC pouzdrech. Na BGA pouzdrech, nebyl tento vztah testován. Únavové koeficienty pro bezolovnatou pájku byly zjištěny experimentálně, tj.  $W_0=0.1573$  a  $k=-0.6342$ .

$$N_f = \left( \frac{\Delta \bar{W}_{total}}{W_0} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (18)$$

kde  $N_f$  je průměrná doba do chyby  
 $\Delta W_{total}$  je celková námaňová energie  
 $W_{0,k}$  jsou únavové koeficienty

### 3.4 Únavové modely založené na akumulaci poškození

Tato specifická skupina únavových modelů zahrnuje vztahy, které uvažují více faktorů, jenž působí na integritu pájeného spoje, tj. teplotu, vlhkost, vibrace apod.

#### 3.4.1 Palmgren-Minerova hypotéza

Palmgren-Minerova hypotéza je tzv. hypotéza kumulace poškození. V případě, že na pájený spoj působí více faktorů, jenž mohou ovlivnit jeho životnost, můžeme použít vztah (19), který tyto faktory bere v úvahu.

$$CDR = \sum_{j=1}^j \frac{N_j}{N_{fj}(50\%)} \leq 1 \quad (19)$$

kde  $N_j$  je aktuálně aplikovaný počet cyklů při specifické úrovni cyklické zátěže  $j$   
 $N_{f,j}$  je únavový život při stejné cyklické specifické zátěži  $j$

### 3.5 Numerické analýzy pro odhad spolehlivosti

Pro odhad spolehlivosti se mimo modelů založených na fyzikálních procesech v pájeném spoji, používá také nejrůznějších matematických aplikací, mezi kterými má velký podíl statistika a pravděpodobnost.

#### 3.5.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Základním principem je diskretizace spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Metoda konečných

prvků je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického (nejnamáhanějšího) místa konstrukce.[21]

### 3.5.2 Weibullovo rozdělení

Weibullovo rozdělení (20) se používá k modelování dat bez ohledu na to, zda je intenzita poruch stoupající, klesající či konstantní. U všech objektů je třeba zaznamenávat dobu do poruchy, cykly do poruchy, přepravní vzdálenost, mechanické namáhání nebo obdobné spojitě parametry. Rozdělení doby života může být modelováno dokonce i tehdy, jestliže všechny objekty neměly poruchu.

$$N_f(x\%) = N_f(50\%) \left[ \frac{\ln(1 - 0.01(x\%))}{\ln(0.5)} \right]^{\frac{1}{\beta_i}} \quad (20)$$

kde  $N_f(x\%)$  je pravděpodobnost kumulativního poškození po  $N$  cyklech  
 $\beta_i$  je počet komponentů typu  $i$

### 3.5.3 Odhad spolehlivosti systému

Pokud potřebujeme odhadnout spolehlivost systému, tj. ne jednotlivé komponenty, můžeme s úspěchem použít model (21) pro odhad spolehlivosti systému, jenž se skládá z více komponentů. Systémy se skládají z mnoha různých komponentů, z nichž většina se vyskytuje ve větších počtech.

Pro odhad spolehlivosti mnohonásobnosti komponentu  $i$  v systému můžeme použít následující vztah:

$$F_{\Sigma}(N) = 1 - \exp \left\{ \ln(1 - 0.01\chi) \sum_{i=1}^i n_i \left[ \frac{N_{i,j}}{N_{f,i,j}(\chi\%)} \right]^{\beta_i} \right\} \quad (21)$$

kde  $F_{\Sigma}(N)$  je pravděpodobnost kumulativního poškození po  $N$  cyklech  
 $n_i$  je počet komponentů typu  $i$   
 $N_{i,j}$  je aktuální počet cyklů aplikovaných na komponentu  $i$  specifické cyklické zátěži  $j$   
 $N_{f,i,j}(\chi\%)$  je únavový život pájeného spoje komponenty  $i$   
 $\beta_i$  je Weibullův sklon pro pájený spoj komponenty  $i$

### 3.6 Únavové modely pro zrychlené testování

Jestliže spolehlivost testovaného produktu je velmi vysoká, je nutné použít pro odhad životnosti zrychleného testování, jelikož testování produktu za běžných podmínek, by bylo velmi zdlouhavé. Zrychlené testování se provádí za podmínek, jenž jsou mnohem náročnější, než kterým bude produkt vystaven v normálním provozu. Takové testy jsou používány pro vyhodnocení životnosti kritických částí systému, jejich identifikaci a jejich následné zdokonalení. Pro urychlení procesu degradace je možné použít mnoho způsobů, mezi které patří vysoké či nízké teploty, nadměrný provoz, elektrické napětí, vibrace atd. Aby bylo



možné analyzovat a správně využít data získaná při zrychleném testování, je důležité počítat s podmínkami, které se předpokládají v normálním provozu.

### 3.6.1 Arrhenius

U tohoto modelu (22) se za klíčové napětí na komponentě uvažuje teplotní napětí, které může vést k chybě, například díky příslušně rostoucí únavě materiálu. Využití toho modelu je mnoho, lze využít pro výpočet chybovosti elektronických komponent způsobených termo-fyzikálními a chemickými procesy, jako pohyb jontů při vytváření intermetalických sloučenin. [1]

Arrheniova reakční doba je dána vztahem:

$$r(\vartheta) = r_0 \exp\left(-\frac{E}{k\vartheta}\right) \quad (22)$$

kde  $r(\vartheta)$  je reakční doba při teplotě  $\vartheta$   
 $r_0$  je konstanta, která závisí na geometrii součástky, tj. velikost apod.  
 $E$  je aktivační energie reakce [eV]  
 $k$  je Boltzmannova konstanta [ $8,617 \cdot 10^{-5}$  eV/K]  
 $\vartheta$  je teplota [K, C+273.16]

$$\lambda = K \exp\left(-\frac{E}{k\vartheta}\right) \quad (23)$$

kde  $\lambda$  je míra chybovosti  
 $K$  je konstanta  
 $E$  je Aktivační energie reakce [eV]  
 $k$  je Boltzmannova konstanta [ $8,617 \cdot 10^{-5}$  eV/K]  
 $\vartheta$  je teplota [K, C+273.16]

Pokud budeme uvažovat, že průměrná životnost komponenty je úměrná k inverzní rychlosti odezvy procesu, dostaneme Arrheniův vztah(24) pro odhad životnosti:

$$\mu(\vartheta) = A \exp\left(\frac{E}{k\vartheta}\right) \quad (24)$$

kde  $\mu(\vartheta)$  je odhad životnosti součástky  
 $A$  je konstanta

Pro datovou analýzu se často používá přirozený logaritmus vztahu (25):

$$\ln(\mu(\vartheta)) = a + \frac{b}{\vartheta} \quad (25)$$

kde  $a$  je  $\ln(A)$   
 $b$  je  $E/k$

Přirozený logaritmus odhadu životnosti  $\mu(\vartheta)$  při teplotě  $\vartheta$  je potom lineární funkce  $1/\vartheta$ . Tato vlastnost je velmi výhodná pro analýzu dat.

$$AF(\vartheta_0, \vartheta_1) = \frac{\mu(\vartheta_0)}{\mu(\vartheta_1)} = \exp\left(\frac{E}{k}\left(\frac{1}{\vartheta_0} - \frac{1}{\vartheta_1}\right)\right) \quad (26)$$

kde  $AF$  je akcelerační faktor  
 $\mu(\vartheta_0)$  je odhad životnosti součástky v běžném prostředí  
 $\mu(\vartheta_1)$  je odhad životnosti součástky v akcelerovaném prostředí  
 $E$  je Aktivační energie reakce [eV]  
 $k$  je Boltzmannova konstanta [ $8,617 \cdot 10^{-5}$  eV/K]

### 3.6.2 IPL

Je dalším velmi používaným vztahem, který nabízí velký okruh aplikací, kde lze použít. Zahrnuje elektrické produkty, kovové produkty jako kuličková ložiska, únavu kovu a další. [1]

Základní model je dán vztahem(27):

$$\mu(\vartheta) = \frac{A}{\vartheta^\beta} \quad (27)$$

kde  $\mu(\vartheta)$  je odhad životnosti, např. průměrná doba do chyby  
 $A, \beta$  jsou specifické konstanty, získané během testování součástky  
 $\vartheta$  je aplikované napětí, např. elektrické napětí

Akcelerační faktor je dán výrazem(28):

$$AF(\vartheta_0, \vartheta_1) = \frac{\mu(\vartheta_0)}{\mu(\vartheta_1)} = \left(\frac{\vartheta_0}{\vartheta_1}\right)^\beta \quad (28)$$

kde  $AF(\vartheta_0, \vartheta_1)$  je akcelerační faktor

### 3.6.3 Eyring

Tento model(29) je velmi podobný Arrheniovu modelu, ale je více všeobecný. Je velmi výhodný v případech, kdy potřebujeme ve spojení s primárním napětím, tedy teplotou, uvažovat ještě další druh napětí, například elektrické napětí nebo relativní vlhkost. Tento model je založený na reakční rychlosti pro chemickou degradaci, odvozenou z kvantové mechaniky. [1]

Základní vztah (29) je:

$$\mu(\varphi, \vartheta) = \frac{B}{\varphi} \exp\left(\frac{E}{k\vartheta}\right) \quad (29)$$

kde  $N_f$  je míra životnosti, například průměrná doba do chyby  
 $\varphi$  je působící stres při teplotě  
 $B$  je konstanta  
 $m$  je exponent tvárnosti  
 $E$  je aktivační energie reakce [eV]

Pro tento vztah dostaneme akcelerační faktor (30):

$$AF = \frac{\mu(\varphi_0, \vartheta_0)}{\mu(\varphi_1, \vartheta_1)} = \frac{\varphi_1}{\varphi_0} \exp\left(\frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right) \quad (30)$$

kde  $E$  je aktivační energie reakce [eV]  
 $k$  je Boltzmannova konstanta  
 $T_0, T_1$  je teplota [K]

## 4. Praktická část

Pro ověření spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů lze využít mnoho nejrůznějších metod a způsobů, jejichž společným účelem, je přinést co nejpřesnější odhad spolehlivosti. Spolehlivost bezolovnatých pájených spojů lze teoreticky odhadnout výpočtem, využitím některého z mnoha únavových modelů, jako je Engelmaier-Wild, Coffin-Manson, Knecht-Fox, Darveaux apod. V dnešní době lze také využít mnoha simulačních programů, např. Ansys, které disponují řadou fyzikálních modelů a při zadání přesných parametrů pájeného spoje, substrátu a součástky, lze dosáhnout velmi přesných výsledků. Spolehlivost bezolovnatých pájených spojů je možné v neposlední řadě ověřovat také prakticky, nejčastěji prostřednictvím tzv. zrychlených zkoušek, kdy je bezolovnatý pájený spoj vystaven nejrůznějším zhoršeným vlivům prostředí. Nejčastěji se jedná o teplotní cyklování pájeného spoje, vystavení teplotním šokům, vibracím, vysokoteplotním rázům atd. Pájený spoj lze také ověřovat z hlediska mechanických vlastností v tahu, stříhu a ohybu. V následujících kapitolách je pro ověření spolehlivosti využita kombinace teoretické i praktické metody a posléze jsou tyto metody porovnány. Nejdříve byl vypočten odhad spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů prostřednictvím dvou nepoužívanějších a nejznámějších únavových modelů a poté byly pájené spoje reálně testovány prostřednictvím teplotního cyklování v teplotní komoře.

### 4.1 Výpočet spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů

Pro výpočet spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů je využit Engelmaier-Wild únavový model a Coffin-Manson únavový model. Tyto nízkocyklové únavové modely jsou ze skupiny modelů, jen počítají s trvalou tvárnou deformací materiálu. V následujících podkapitolách je proveden výpočet pro každý z těchto dvou modelů, při stejných parametrech dummy BGA pouzdra, provozních podmínek a pájky.

#### 4.1.1 Engelmaier-Wild model

Pro odhad spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů u BGA pouzdra bylo použito dummy BGA 225T1,5 – DC15(viz.tab.4). Pro spoje BGA pouzdra je ve výpočtu uvažováno s bezolovnatou pájkou SAC 305(viz.Tab.5). Pájka SAC 305 je bezolovnatá slitina, která obsahuje 96,5% cínu, 3% stříbra a 0,5% mědi. SAC 305 je blízká náhradě za slitinu 63Sn/37Pb pro pájení vlnou a ruční pájení. Koeficient tvárnosti(viz.Tab.5), byl vypočten podle vztahu(6). Ve výpočtu je uvažováno cyklování v teplotní komoře od -20 °C do 100 °C, při prodlevě 15 minut, na minimální a maximální teplotě(viz.tab.5). Hodnotu  $h$ , jenž udává vzdálenost mezi BGA pouzdrem a substrátem FR4, jsem změřil pomocí mikroskopu, z výřezu zapájeného BGA pouzdra na substrátu(viz.Obr.13). Odhad předpokládaného počtu cyklů do poruchy je uveden v tabulce(viz.Tab.6) a byl vypočten podle Engelmaier-Wild únavového modelu(3). Tento vztah je velmi vhodný pro co nejpřesnější odhad spolehlivosti, jelikož je možné v exponentu tvárnosti pájky počítat s frekvencí cyklování.

**Tab. 4:***Parametry komponentů pro výpočet spolehlivosti*

Pouzdro, DPS	DNP(mm)	h(mm)	CTE(ppm/°C)
BGA 225T1,5 – DC15	13,5	0,4681	14
DPS (FR4)	-	-	12

**Tab. 5:***Provozní podmínky experimentu*

Pouzdro	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	T <sub>sj</sub> (°C)	ΔT(°C)	T <sub>D</sub> (min)
BGA 225T1,5 – DC15	-20	100	40	120	15

**Tab. 6:***Koeficienty pro výpočet exponentu tvárnosti pájky*

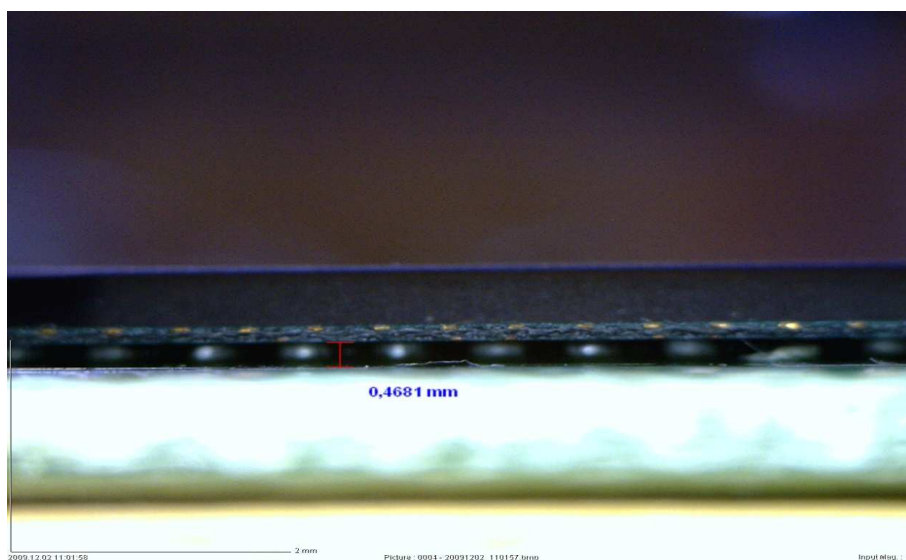
Pájka	C0	C1	C2	T <sub>0</sub>
SAC 405/305	0,425	9,30E-04	-1,92e-02	500

**Tab. 7:***Parametry pájky*

Pájka	c	ε <sub>f</sub>
SAC 305	0,449	0,425

**Tab. 8:***Parametry pro výpočet životnosti BGA pouzdra*

Pouzdro	ΔD	N(50%) (Cyklů)
BGA 225T1,5 – DC15	0,00865	13587

**Obr. 10:***Vzdálenost mezi BGA pouzdrem a DPS*

#### 4.1.2 Coffin-Manson model

Z prvního výpočtu, jenž byl proveden využitím Engelmaier-Wild únavového modelu, vyplývá, že při zadaných parametrech komponentů (viz.Tab.4), provozních podmínkách (viz.Tab.5) a pájky (viz.Tab.6), bude předpokládaná doba do poruchy 13587 cyklů. Pro ověření a porovnání získaného údaje, byl použit příbuzný vztah Engelmaier-Wild modelu, tj. Coffin-Mansonův vztah. Velkou nevýhodou tohoto modelu je absence úvahy frekvence cyklování ve výpočtu. Pro výpočet byly použity parametry (viz.Tab.8) stejného dummy pouzdra BGA 225T1,5 – DC15 a DPS. Jediný rozdíl je pouze u parametru L, jenž u Coffin-Mansonova vztahu představuje délku součástky, na rozdíl od Engelmaier-Wild vztahu, kde DNP je délkou od hrany do středu BGA pouzdra, resp. Součástky. Taktéž jsou stejné provozní podmínky experimentu (viz.Tab.5), tj. cyklování v teplotní komoře od -20 °C do 100 °C, při teplotním rozdílu 120 °C. Parametry pájky se liší proti předchozímu výpočtu, jelikož byly získány experimentálně, na rozdíl od Engelmaier-Wild vztahu, kde lze koeficient tvárnosti, vypočítat prostřednictvím koeficientů  $C_0, C_1, C_2$  a a započítat do něj frekvenci cyklování. Dosazením všech parametrů do vztahu(1), byl získán výsledek 8455 cyklů do poruchy. Toto číslo se značně liší od Engelmaier-Wild vztahu, kterým byl vypočten výsledek 13587 cyklů do poruchy. Tento rozdíl je způsoben rozdílem v koeficientu tvárnosti pájky, jenž je v případě Engelmaier-Wild vztahu zpřesněn, z hlediska úvahy frekvence cyklování ve výpočtu.

**Tab. 5:** Parametry komponentů pro výpočet spolehlivosti

	L(mm)	h(mm)	$\alpha$ (ppm/°C)
BGA 225T1,5 – DC15	27	0,4681	14
DPS (FR4)	-	-	12

**Tab. 5:** Provozní podmínky experimentu

Pouzdro	$T_{min}(^{\circ}C)$	$T_{max}(^{\circ}C)$	$\Delta T(^{\circ}C)$
BGA 225T1,5 – DC15	-20	100	120

**Tab. 6:** Parametry pájky

Typ pájky	c	$\epsilon'_f$
SAC 305	-0,6659	2,2632

**Tab. 7:** Parametry pro výpočet životnosti BGA pouzdra

Pouzdro	$Y_p$	N(50%) (Cyklů)
BGA 225T1,5 – DC15	0,06921	8455

## 4.2 Testovací struktura pro testování spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů

Pro ověření výše uvedeného teoretického výpočtu bylo rozhodnuto realizovat experiment za následujících podmínek:

- testovací součástky – dummy BGA 225T1,5-DC15,
- vývody testovacího BGA – bezolovnatá pájka SAC 305,
- použité metody pájení-pájení přetavením v parách,
- materiál desky plošného spoje – FR4, tloušťka mědi – 35  $\mu\text{m}$ ,
- povrchová úprava desky plošného spoje – HAL,
- teplotní cyklus -20 °C až 100 °C, prodleva na maximální a minimální teplotě 15min, délka cyklu přibližně 50 minut.



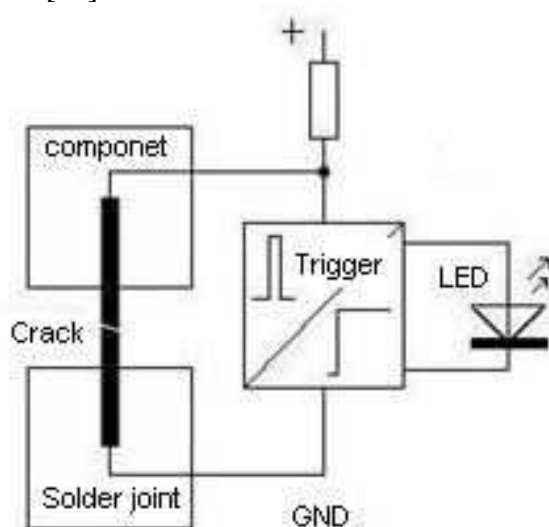
**Obr. 11:** Blokové schéma testovací struktury

Testovací struktura(viz.Obr.11), na níž byl proveden experiment, týkající se reálné spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů dummy pouzdra BGA 225T1,5 – DC15, zahrnuje testovací jednotku, jenž představuje teplotní komora CTS T-40/25(viz.obr.12), dále indikační jednotku(viz.obr.13.) a řídicí jednotku, tj PC. Teplotní komora CTS T-40/25 je běžná teplotní komora řízená integrovaným mikroprocesorem. Ovládání teplotní komory je možné přes ovládací panel, umístěný na teplotní kostře teplotní komory a také přes PC, prostřednictvím rozhraní RS 232, které tato teplotní komora podporuje. Pracovní rozsah této teplotní komory je -40°C až 180°C a objem vnitřního prostoru, do něhož lze vložit testovaný objekt, 25l.

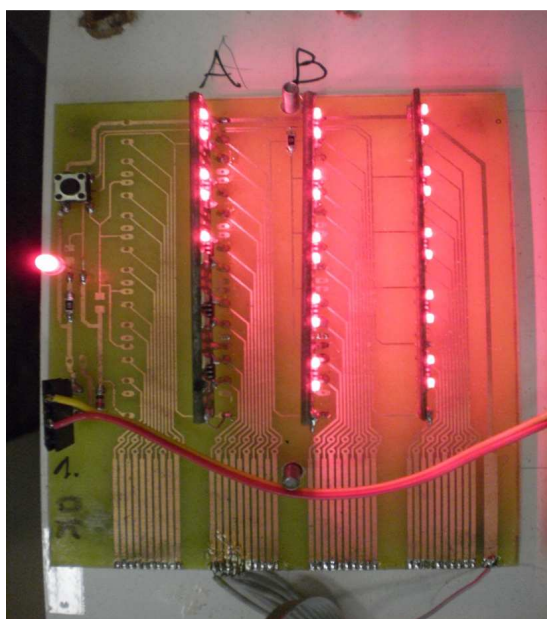


**Obr. 12:** Teplotní komora CTS T-40/25

Indikační jednotka je deska plošného spoje s LED diodami(viz.Obr.14), které jsou řízeny klopnými obvody. Pokud dojde k přerušení spoje, rozsvítí se indikační LED dioda, která je napájena z proudového zdroje. Bylo zjištěno, že porucha má časově proměnný charakter ve formě impulsů, které se s přibývajícím počtem teplotních cyklů prodlužují. Tyto impulsy jsou zaznamenávány paměťovým elementem ve formě klopného obvodu, který se nastartuje a LED a dioda trvale svítí. Porucha může být indikována pro každý spoj samostatně, nebo se spojuje několik spojů sériově (Daisy Chain propojení). Software klopného obvodu je sestaven tak, aby klopný obvod indikoval přerušení delší jak 100ms. Indikace kratších napěťových impulsů by byla problematická, klopný obvod byl spouštěn náhodnými impulsy z okolí. [23]



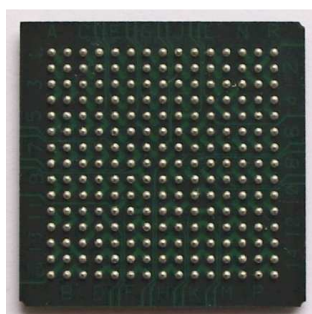
**Obr. 13:** *Princip funkce indikační jednotky*



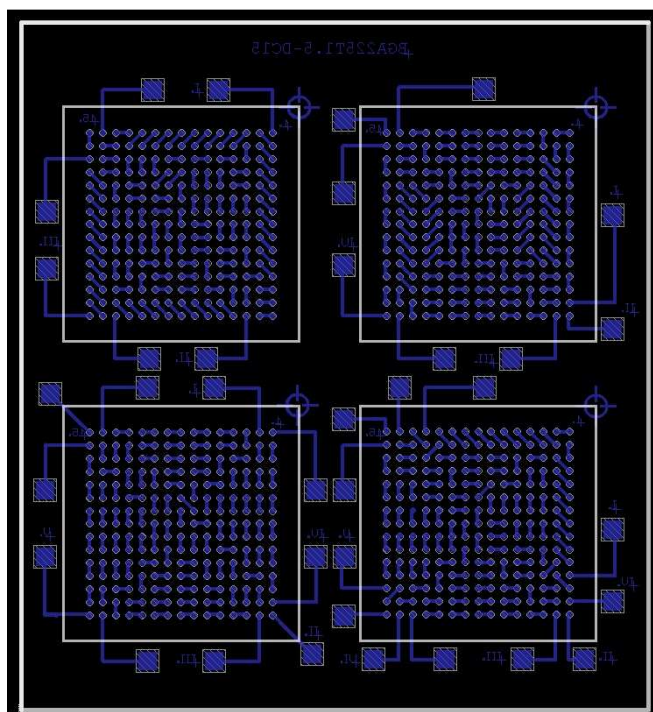
**Obr. 14:** *Indikační DPS s LED diodami*



Poslední částí testovací struktury je testovací deska plošného spoje, na níž je osazeno dummy pouzdro. Pro tento experiment bylo zvoleno dummy BGA pouzdro 225T1,5-DC15(viz.Obr.15) a pro toto pouzdro byla poté v programu Eagle navržena testovací deska(viz.Obr.16). Na této desce jsou motivy až pro čtyři BGA pouzdra. Na každém z těchto motivů jsou navrženy plošné spoje tak, že po zapájení BGA na testovací desku, se jednotlivé bezolovnaté pájené spoje zapojí do série a lze, tímto způsobem vhodně testovat jednotlivé oblasti pájených spojů. Na každém z motivů se testují oblasti pájených spojů nejprve diagonálně, poté se přidávají další vhodné oblasti, např. hrany BGA pouzdra.

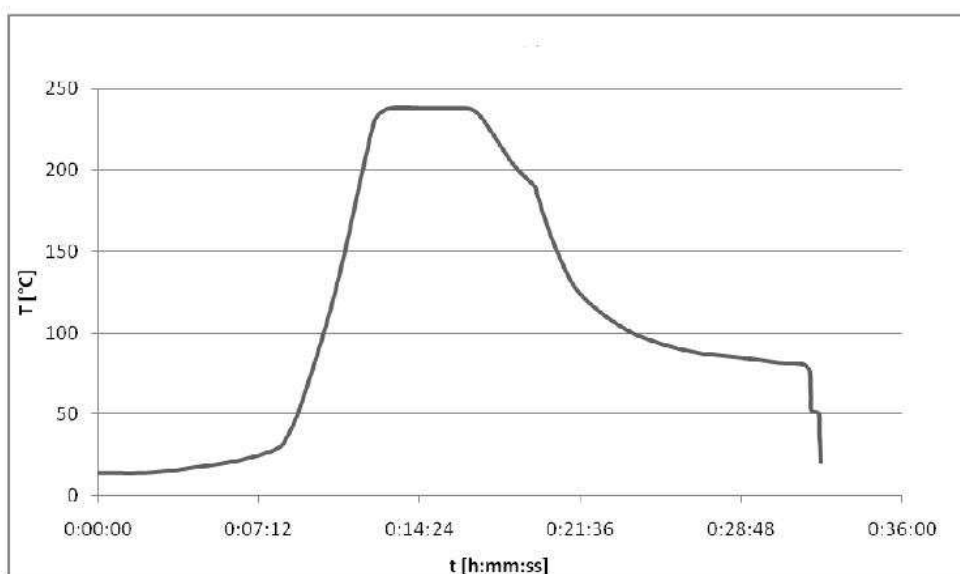


**Obr. 15:** *dummy BGA pouzdro 225T1,5-DC15*



**Obr. 16:** *Návrh testovací DPS v programu Eagle*

Testovací deska plošného spoje byla zapájena pájením v parách(viz.Obr.17). Pájení v parách je z hlediska rozložení teploty jednou z nejpříznivějších metod. Pájecí teplota je definována bodem varu kapaliny, což zaručuje v celém prostoru konstantní teplotu. Nasycená pára neobsahuje kyslík, takže při pájení nedochází k oxidaci pájených povrchů. To je zvláště příznivé pro bezolovnaté pájení, neboť proces probíhá v ochranné atmosféře a v konstantní teplotě, která nepřesahuje 230°C. Podstatnou výhodou pájení v parách je nižší přetlak par v součástkách v procesu pájení, který souvisí s nižší pracovní teplotou. Vlhkost uvnitř pouzder totiž způsobuje uvnitř pouzder tlak par, jenž může vést k delaminaci vrstev a k následné ztrátě funkceschopnosti. Čím je hodnota teploty vyšší, tím je větší i tlak par uvnitř pouzdra a riziko poškození se zvyšuje. Za kritické jsou již považovány teploty přesahující 200°C a potom tlak par dále s rostoucí teplotou narůstá téměř exponenciálně. Tato skutečnost je pro bezolovnaté pájení z důvodu zvýšených teplot zvláště závažná, především pro větší součástky, jako např. BGA. [20]

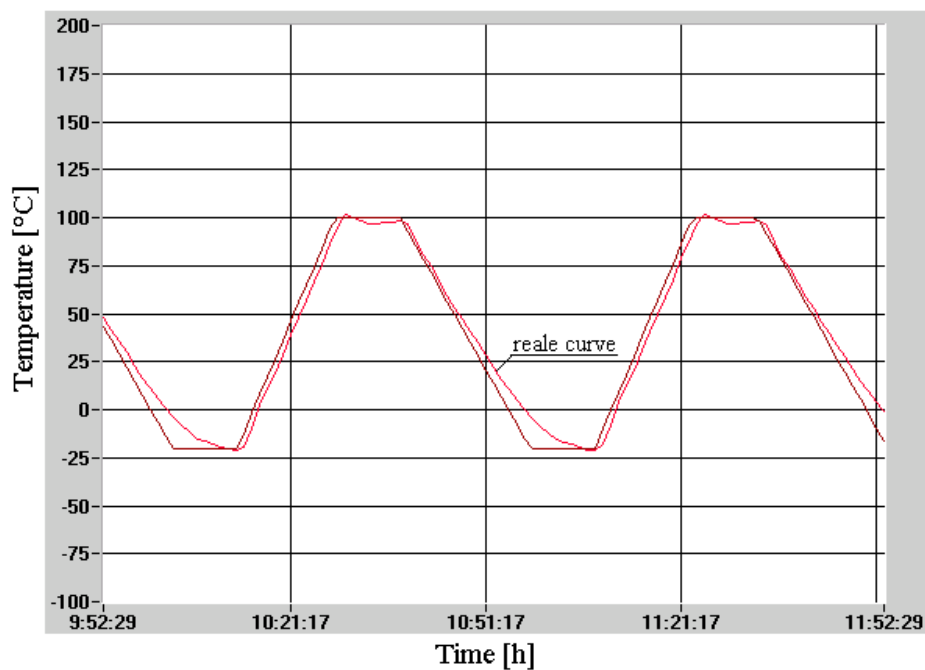


**Obr. 17:** Teplotní profil pájení v parách

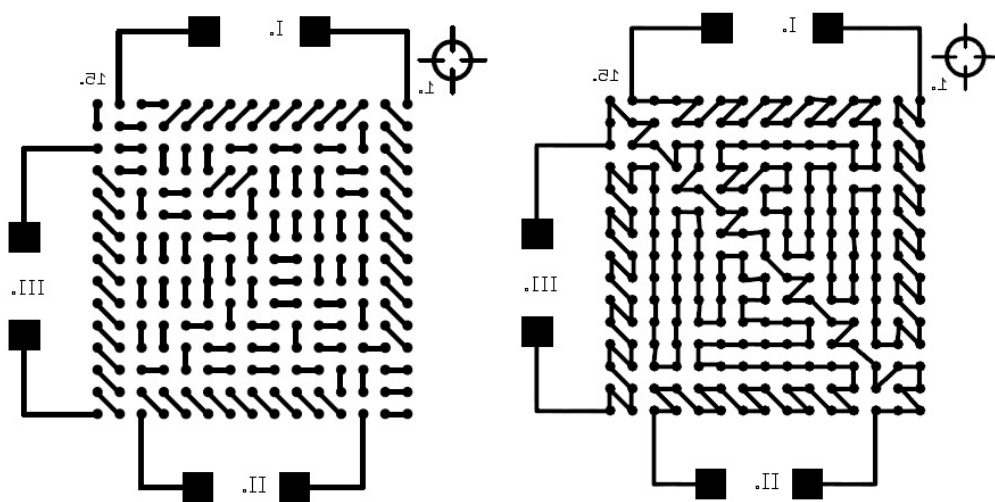
Testovací deska s dummy pouzdrem BGA 225T1,5 - DC15 je po zapájení uložena ve vnitřním prostoru teplotní komory a je vystavena teplotnímu cyklování. Na testovací desce (viz.Obr.20) jsou plošky pro pájené spoje dummy BGA pouzdra sériově spojeny(viz.Obr.19) a testují se oblasti, které tímto spojením vznikly. Při poruše pájeného, tj. při ztrátě vodivosti tohoto pájeného spoje, dojde k přerušení obvodu, v celé oblasti. Poté se na indikační desce plošného spoje s LED diodami, jenž je umístěna, vně teplotní komory, rozsvítí dioda, která odpovídá příslušné oblasti, v níž došlo k poruše jednoho či více pájených spojů.

Při testování bezolovnatých pájených spojů dummy pouzdra BGA 225T1,5 - DC15 bylo využito teplotního cyklování v teplotní komoře, při teplotním rozsahu je -20°C až 100°C, tj. při rozdílu teplot 120°C. Na minimální i maximální teplotě byla vždy prodleva 15 minut.(viz.Obr.18). Za těchto podmínek bylo dosaženo 4370 cyklů bez poruchy. Z důvodu

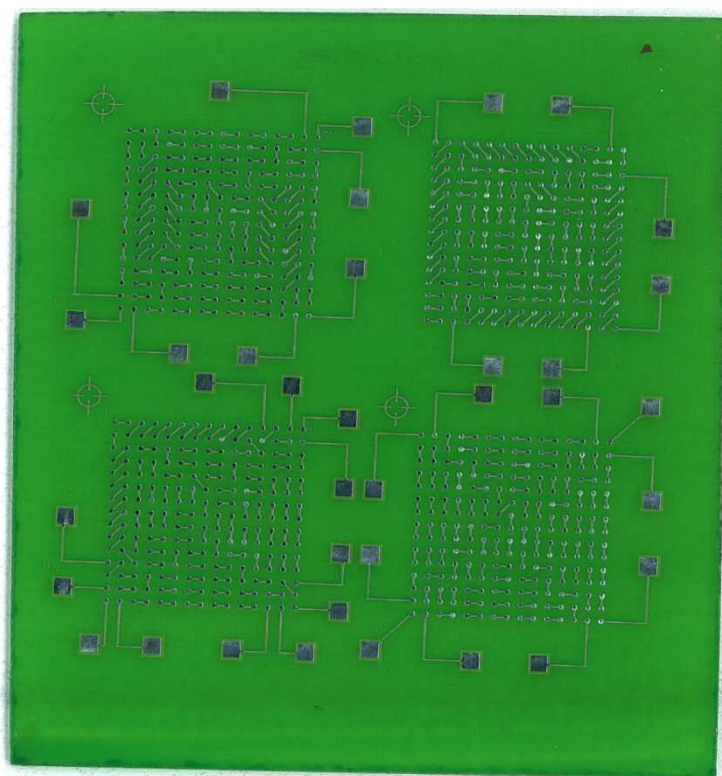
časového deficitu, byl experiment při dosažení 4370 cyklů ukončen, a tudíž nelze tento výsledek porovnat přesněji porovnat s teoretickým výpočtem, jenž uvádí 13587 cyklů do poruchy.



**Obr. 18:** *Cyklovací profil*



**Obr. 19:** *Motiv plošného spoje na testovací DPS před osazením dummy BGA pouzdra a po osazení*



**Obr. 20:** Neosazená testovací DPS

Vyhodnocování poruchy bylo provedeno dle standardu IPC-SM-785. Během cyklování se měří případné přerušení pájeného spoje. Podle standardu IPC-SM-785 je porucha v pájeném spoji definována jako první přerušení elektrického spojení, které je potvrzeno dalšími 9 přerušeními během následujících 10% životního cyklu. Standard také udává následující kritéria pro detekci poruchy v pájených spojkách a to jsou:

- nejméně jedno spojitě přerušení o délce jedné mikrosekundy nebo i kratší zaznamenané v každé testovací smyčce (během intervalu výskytu do maximálně 2 sekund)
- nejméně 10 takových přerušení zaznamenaných v jedné testovací smyčce potvrdí první indikaci poruchy (porucha opravdu nastala).
- monitorovací proud nesmí být větší než 2mA a napětí nesmí být vyšší než 10V. Elektrické přerušení se projeví nárůstem odporu na pájeném spoji (o hodnotě 1 kohm či vyšším) v průběhu dané testovací smyčky. Problémem může být indikace poruchy vlivem elektrických rušení v době měření.

## 5. Závěr

Tato práce měla za cíl provést rešerši v oblasti odhadu spolehlivosti pájených spojů, navrhnout nejvhodnější únavový model pro odhad spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů a navrhnout testovací strukturu pro reálné ověření spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů a získané výsledky porovnat s teoretickým výpočtem podle vhodného únavového modelu. V práci je popsána problematika životnosti pájených spojů a faktory, které mají vliv na správnou funkčnost pájených spojů. Jsou zde popsány jednotlivé únavové modely, a ty jsou rozděleny do skupin, podle uvažovaného typu deformace či poškození.

Bylo snahou přiblížit fyzikální procesy při degradaci pájených spojů, tj. pružnou a tvárnou deformaci pájeného spoje, deformaci tečením, vliv pohybu energie v pájeném spoji a akumulaci poškození. Ke každému z těchto faktorů je v práci uvedeno několik únavových modelů, které tyto faktory uvažují. Zmíněné únavové modely jsou zde diskutovány, jak z hlediska obecného využití pro odhad spolehlivosti pro olovnaté či bezolovnaté pájené spoje, tak se zaměřením úzce na bezolovnaté kuličkové pájené spoje u BGA pouzder. Jako nejvhodnější únavový model pro odhad spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů, se jeví vztah Engelmaier-Wild. Tento model je možné použít pro olovnaté a a nejběžnější bezolovnaté pájky. Hlavní výhodou tohoto modelu je možnost, počítat v exponentu tvárnosti s frekvencí cyklování a s teplotním rozsahem, při kterém je pájený spoj namáhán.

Dále jsem se podle tohoto únavového modelu, pokusil spočítat odhad spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů u dummy BGA 225T1,5 – DC15 pouzdra. Podle Engelmaier-Wild vztahu bylo vypočteno 13587 cyklů do poruchy za definovaných podmínek. Pro porovnání byla spolehlivost pro zmíněné dummy BGA pouzdro, vypočtena také podle Coffin-Manson vztahu, s výsledkem 8455 cyklů do poruchy. Tento značný rozdíl mezi oběma modely je způsoben, koeficientem tvárnosti, jenž umožňuje u Engelmaier-Wild vztahu, započítat frekvenci cyklování, která má velký vliv na výslednou spolehlivost bezolovnatého pájeného spoje.

Pro dummy BGA 225T1,5 – DC15 pouzdro byla navrhnutá a vyrobená testovací deska, u níž byly vyhodnoceny vlivy teplotního cyklování na integritu bezolovnatých pájených spojů. Při testování bezolovnatých pájených spojů dummy BGA 225T1,5 – DC15 pouzdra v teplotní komoře, teplotním cyklováním, bylo dosaženo 4370 cyklů. Z důvodu časového deficitu, byl experiment při dosažení 4370 cyklů ukončen, a tudíž nelze přesněji porovnat tento údaj s teoretickým výpočtem, podle Engelmaier-Wild vztahu, jenž byl 13587 cyklů do poruchy. Jelikož ale nedošlo během 4370 cyklů k poruše, lze předpokládat, že výsledek získaný výpočtem podle únavového modelu je správný.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] MURTHY, D.N.P, RAUSAND, Marvin, OSTERAS, Trond. Product reliability Specification and Performance. [s.l.] : Springer, 2008 [cit. 2009-10-29]. 290s
- [2] ZSCHECH,Ehrenfried,WHELAN, Caroline, MIKOLAJICK, Thomas. Materials for Information Technology : Devices, Interconnects and Packaging. Springer, 2005 [cit. 2009-10-30]. 490s.
- [3] SUBRAMANIAN, K.N. Lead-free Electronic Solders : A Special Issue of JOURNAL OF MATERIAL SCIENCE:MATERIALS IN ELECTRONICS. Springer, 2007 [cit. 2009-11-15]. 361s.
- [4] PUTTLITZ, Karj J. , STALTER, Katheen A. Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. Marcel Dekker, 2004 [cit. 2009-11-15], 1044s.
- [5] BATH, Jasbir. Lead-Free Soldering, Springer 2007 [cit. 2009-11-15], 307s.
- [6] LEVITIN, Valim. High Temperature Strain of Metals and Alloys. WILEY-VCH, Weinheim, 2006 [cit. 2009-11-15], 173s.
- [7] MOALLI, John. Plastics Failure:Analysis and Prevention. Plastics Design Library, 2001 [cit. 2009-11-15], 337s.
- [8] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů, VUTIU, 2006 [cit. 2009-11-15], 379s.
- [9] VOJTĚCH, D. Kovové materiály. VŠCHT Praha 2006 [cit. 2009-11-18], 225s.
- [10] ENGELMAIER, W. Surface Mount Solder Joint Reliability: Issues, Design, Testing, Prediction, Engelmaier Associates, Mendham, 1995.
- [12] ENGELMAIER, W. Reliability for surface Mount Solder joints:Physics and Statistics of Failure, Mount Int, San Jose 1992, 443s
- [13] ENGELMAIER, W. Solder Joint Reliability, Accelerated Testing and ResultEvaluation, John Lau, New York 1990.
- [14] ENGELMAIER, W. Pb-free solder creep-fatigue reliability models updated and extended, Global SMT & Packaging, Říjen 2009 [cit. 2009-12-16]. 36-38s.

- [15] ENGELMAIER, W. How to estimate solder joint reliability, part 1, Global SMT & Packaging, Březen 2007 [cit. 2009-12-10]. 64-66s.
- [16] ENGELMAIER, W. How to estimate solder joint reliability, part 2, Global SMT & Packaging, září 2007 [cit. 2009-118]., 60-64s.
- [17] ENGELMAIER, W. How to assure solder joint reliability with accelerated testing, Global SMT & Packaging, Listopad 2007 [cit. 2009-12-16], 62-65s.
- [18] LEE, W.W, NGUYEN, L.T, SELVADURAY, G.S. Solder joint fatigue models: review and applicability to chip scale packages, Elsevier 2000 [cit. 2009-11-18], 231-244s.
- [19] FAN, H. , CHAN, Y.C. The Effect Of Reflow Condition On The Characteristics Of PBGA Solder Joint, City university of Hong Kong 1998, 5s.
- [20] SZENDIUCH, I. Základy technologie mikroelektronických systémů obvodů systémů. VUTUM, 2006 [cit. 2010-06-01], 378s.
- [21] Wikipedia [online]. 2009 [cit. 2009-12-16]. Dostupný z www: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_konečných\\_prvků](http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konečných_prvků)
- [22] Wikipedia [online]. 2009 [cit. 2009-12-18]. Dostupný z www: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue\\_\(material\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material))
- [23] VLACH, B. Creep a lom při creepu [online]. [cit. 2010-03-06]. Dostupný z www: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/09%20-%20Creep.doc>
- [24] Únava materiálu.[online]. [cit. 2010-03-06]. Dostupný z www: <http://wood.mendelu.cz/cz/.../05%20-%20Unava%20materialu.doc>
- [25] Isola Group. Datasheet Duraver E-Cu-17 [online]. Dostupný z www: [http://www.isolagroup.com/e/ecomaXL/get\\_blob.php?name=DURAVER\\_B-DE\\_117-6\\_e\\_092008.pdf](http://www.isolagroup.com/e/ecomaXL/get_blob.php?name=DURAVER_B-DE_117-6_e_092008.pdf)
- [26] Isola Group. Datasheet G-200 [online]. Dostupný z www: [http://www.insulectro.com/content\\_media/file/isola\\_DSG20051608.pdf](http://www.insulectro.com/content_media/file/isola_DSG20051608.pdf)